

О.В. Глоба
 М.О. Прядко, д-р техн. наук
 В.З. Глоба, А.В. Форсюк,
 кандидати техн. наук

ВТРАТИ ТИСКУ В ПРОЦЕСІ ВИПАРОВУВАННЯ ПЛІВОК ЯБЛУЧНОГО СОКУ

Наведено результати експериментальних досліджень втрат тиску в процесі випаровування низхідних плівок яблучного соку у вертикальній трубі. Необхідність досліджень викликана потребами розроблення і проектування випарної установки яблучного соку на Чернівецькому ОЖК. Отримані результати доповнюють науково-технічну базу створення випарних установок фруктових соків.

The results of experimental research of pressure loss with apple juice's coating that flow down and vaporize in the vertical pipe is proposed. A necessity of research was caused requirements of designing and projection of the apple juice's evaporation plant on the Chernyvetsky Oil Fat Plant. The obtained results complete a science base of evaporation plant of the fruit juice creating.

Найпоширенішим методом концентрування яблучних та інших фруктових соків є випаровування. Технологічний процес концентрування здійснюється у випарниках плівкового типу, в яких вода із соку випаровується в тонкій пристінній плівці. Плівка соку рухається по внутрішній поверхні труби переважно під дією гравітаційних сил. Сокова пара рухається разом із плівкою. Двофазні потоки в трубах випарника можуть мати кільцеву або дисперсно-кільцеву форму.

Гідродинаміку плівок і кільцевих та дисперсно-кільцевих потоків досліджено досить широко [1–4]. Результати досліджень показують, що в трубах випарних апаратів (ВА) спостерігаються всі можливі поєднання режимів течії рідини і пари, ускладнені міжфазовим масопереносом. Рельєфність поверхні плівки і взаємодія ядра потоку з плівкою підвищують інтенсивність теплообміну на міжфазній по-

верхні, але призводять до гідравлічних втрат, у кілька разів більших, ніж у сухому каналі.

Дані про гідродинамічні процеси в плівкових випарних апаратах фруктових соків обмежені, рекомендовані залежності для розрахунку втрат тиску не охоплюють реальних режимних параметрів. Майже зовсім не досліджено зону високих концентрацій і тиску, нижчого ніж 0,3 бар (вакууму), тобто умови роботи кінцевого ВА. Результати існуючих досліджень цієї зони через їх обмеженість практично не можна використати для розроблення випарних апаратів яблучного соку. Це зумовило необхідність проведення експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження втрат тиску в процесі випаровування низхідних плівок яблучного соку при супутньому русі пари ми досліджували на однотрубній моделі випарного апарата. Дослідна труба внутрішнім діаметром 32 мм включала шість діля-

нок по 600 мм завдовжки. Плівка соку на внутрішній поверхні дослідної труби генерувалася переливанням з розподільної камери через закруглений вінець верхнього кінця труби, тобто відомим методом переливання через поріг. Щоб розширити діапазон швидкості легкої фази, передбачено вдування пари на вхід дослідної труби. В розподільній камері перед входом в експериментальну трубу пара, яку вдували, набувала стану сокової пари.

Область досліджень характеризується такими параметрами: масова частка сухих речовин у соку $CP = 15...70\%$, тиск пари в сепараторі $P_0 = 0,1...0,6$ бар, об'ємна щільність зрошення $\Gamma_v = (8...60) \cdot 10^{-5}$ м²/с, швидкість вторинної пари $W_0'' = 0...160$ м/с.

У дослідах вимірювали витрати, концентрацію і температуру соку на вході в трубу, параметри грійної пари і кількість її конденсату з кожної дослідної ділянки, температуру стінки труби, п'єзометричні рівні на межі ділянок і в сепараторі.

Дані вимірювання дали змогу визначити розподіл тиску, температури і витрат фаз на ділянках дослідної труби, концентрацію і теплофізичні властивості соку, температурний напір і щільність теплого потоку, всі зовнішні характеристики течії у дослідній трубі, достатні для розроблення промислових випарних апаратів і випарної установки.

Витрати рідини в плівці, товщина плівки та інші структурні характеристики потоку, потрібні для узагальнення результатів досліджень, розраховували й оцінювали за відомими залежностями.

Узагалі по стінках дослідної труби рухається плівка рідини, покрита складною системою хвиль, а в ядрі — потік вторинної пари з краплями рідини. Між ядром потоку і плівкою відбувається обмін масою: з плівки в паровий потік зриваються краплі й фрагменти рідини, подрібнюються в паровому потоці, висаджуються з потоку на поверхню плівки. Паровий потік обтікає хвилі на поверхні плівки і краплі рідини, що перебувають в ядрі. Ці хвилі й краплі є для потоку численними елементами опору. П.Л. Капиця запропонував хвилі на поверхні плівки вважати елементами шорсткості. Концепція набула розвитку. За даними Уолліса, хвильова кільцева плівка еквівалентна однорідній піщаній шорсткості K_s , яка приблизно в чотири рази перевищує товщину плівки.

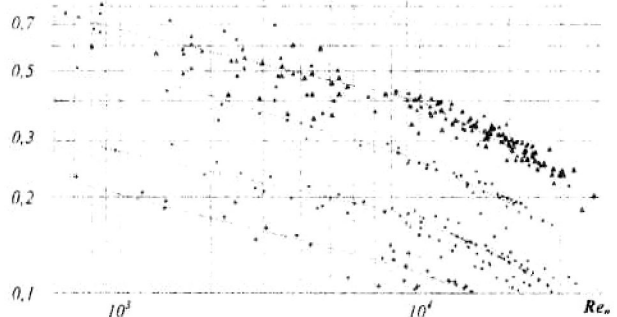
Шорсткість K_s залежить від висоти і дисперсії хвиль, а визначатися може товщиною плівки і швидкістю руху пари в ядрі потоку. Збільшенню дисперсії відповідає підвищення опору і шорсткості. Пояснюється це явище збільшенням нерегулярності перешкод рухові парового потоку. Визначення шорсткості K_s ускладнюється тим, що немає достатньо надійних методів точного розрахунку товщини плівки.

На поверхні плівки є поодинокі великі хвилі та система капілярних хвиль. Великі й капілярні хвилі рухаються з різними фазовими швидкостями. Форма поверхні плівки та особливості руху в ній маси складні. Щоб їх описати математично, треба враховувати статистичні властивості хвильової поверхні та руху маси, процеси обміну маси між плівкою і ядром потоку. Тому математична модель течії, здатна в широкій області адекватно відображати фізичні процеси руху і взаємодії фаз, ще не створена.

Первинна обробка та аналіз експериментальних даних показали, що за абсолютним значенням

гідродинамічний опір у дослідній трубі задовільно узгоджується з результатами інших досліджень [3, 4] і з опором у діючих промислових випарних апаратах яблучного соку. Типовий розподіл по довжині труби загальних втрат тиску та окремо на тертя і прискорення в процесі випаровування (рисунки) свідчить про їхню залежність від гідродинамічних характеристик потоку і про те, що основною складовою втрат тиску є втрати на тертя.

У першому наближенні встановлені залежності втрат тиску тертя здавались логічними і відповідали особливостям процесів у дослідній трубі. Результати узгоджувались із загальним уявленням про гідродинаміку і тепловіддачу за цих умов. Детальніший аналіз показав, що коефіцієнти тертя на міжфазній поверхні збільшувалися з підвищенням витрат і концентрації соку та зниженням тиску в трубі. Таку залежність можна пояснити збільшенням в'язкості соку і пари. Розширення дослідних даних (див. рисунки) показує, що коефіцієнт тертя на міжфазній поверхні однозначно за числами Прандтля і Рейнольдса рідини не визначається. Іншими словами, числа Прандтля і Рейнольдса в даному разі не можуть бути визначальними.



Коефіцієнт тертя на міжфазній поверхні:
 Δ — $P_0 = 0,12$ бар, $Pr = 90...350$, $Re_p = 29...60$; \blacktriangle — $P_0 = 0,12$ бар, $Pr = 90...350$, $Re_p = 61...160$; \bullet — $P_0 = 0,30$ бар, $Pr = 90...400$, $Re_p = 17...90$; \circ — $P_0 = 0,30$ бар, $Pr = 4...5$, $Re_p = 600...1000$; $+$ — $P_0 = 0,60$ бар, $Pr = 3...5$, $Re_p = 850...1400$

За всіма ознаками двофазні потоки в процесі випаровування яблучного соку в експериментальній трубі можуть бути зведені до кільцевих або близьких до кільцевих. У спрощеному трактуванні їх ми припускали таке:

- товщина плівки значно менша від діаметра труби, а крапельна рідина рухається поблизу плівки;
- напряга тертя в плівці постійна і дорівнює напрузі тертя на поверхні розподілу фаз;
- густина пари незначна порівнянно з густиною рідини;

ядро потоку має властивості вторинної пари, втрати енергії парового потоку на взаємодію з крапельною рідиною належать до втрат на поверхні плівки.

Поверхня рідинної плівки збурена і покрита складною системою хвиль. Відносно парового ядра хвилі на поверхні плівки являють собою елементи шорсткості і є причиною підвищення напруги і втрат тиску по довжині труби. Втрати тиску тертя на міжфазній поверхні кільцевих потоків зручно пов'язувати з градієнтом тиску парової фази, що визначається за її зведеною швидкістю.

Звертаючи увагу на складність механізмів, які спричиняють зростання напруги на поверхні розподі-

лу фаз у кільцевих і дисперсно-кільцевих потоках, Х'юїт [5] стверджує, що ефективна шорсткість збуреної хвилястої поверхні чутлива до товщини плівки і досить консервативна до швидкості руху фаз. Тобто в першому наближенні шорсткість плівки визначається її товщиною. Для розрахунку коефіцієнта тертя на міжфазній поверхні кільцевого потоку пропонується [5] модифіковане рівняння Уоліса, яке включає симплекс ρ_p/ρ_n зведення до конкретного стану вторинної пари:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta}{d} \right], \quad (1)$$

де δ і d — товщина плівки і діаметр труби; ρ_p і ρ_n — густини рідини і пари.

Щоб визначити середні значення швидкості й товщини плівки високов'язкого розчину в довгій трубі при щільності теплового потоку, меншій ніж 35 кВт/м^2 , і швидкості пари на виході з труби до 15 м/с , можна скористатися залежностями:

$$\omega = 0,46 \Gamma_{\text{вх}}^{0,45} \mu^{-0,1}, \quad (2)$$

$$\delta = \Gamma_{\text{вх}} / \omega. \quad (3)$$

Емпіричну залежність (2) виведено [4] при атмосферному тиску вторинної пари. Вона проста, поширюється на низькі числа Рейнольдса рідини і, на відміну від інших, враховує вплив в'язкості.

Як на нашу думку, то такий низький ступінь впливу в'язкості на швидкість плівки не може зберігатися в усій зоні зміння концентрації соку. Деяким чином це підтверджують результати розрахунків. Порівняння розрахованих за залежностями (1) — (3) та експериментальних коефіцієнтів тертя показало значні розбіжності результатів, особливо в зоні низьких концентрацій соку. Співвідношення розрахованих і дослідних коефіцієнтів тертя в зоні вмісту сухих речовин $CP = 15 \dots 70 \%$ лежить в інтервалі $(0,21 \dots 0,25) \ln(CP)$. Відповідне корегування формули (1) надає їй вигляду

$$f = \frac{0,073 \ln(CP)}{Re_n^{0,25}} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta}{d} \right]. \quad (4)$$

Залежність (4) задовільно узагальнює експериментальні дані за допомогою зовнішніх характеристик. Вона придатна для розрахунку втрат тиску в усій оговореній вище зоні. Здебільшого — це вся зона роботи промислових випарних апаратів. Формулу ми широко використали при розробленні та проектуванні випарної установки Чернівецького ОЖК.

За межею швидкості пари, що відповідає визначеній [4] при атмосферному тиску швидкості $W_0'' = 15 \text{ м/с}$, розраховані коефіцієнти тертя на міжфазній поверхні відхиляються вгору від дослідних. Річ у тім, що в супутніх низхідних потоках із зростанням швидкості пари посилюється її механічна взаємодія з рідиною і з деякого моменту швидкість плівки збільшується. Відповідно зменшується товщина плівки. В формулах (2) і (3) цей факт не враховується.

В апаратах плівкового типу з низхідним супутнім рухом фаз товщину плівки в зоні впливу парового потоку при атмосферному тиску рекомендується [2] визначати за емпіричною залежністю, отриманою Л.Я. Живайкіним:

$$\delta_w = [1 - 0,022(W_0'' - 4)] \delta, \quad (5)$$

де δ — товщина плівки при вільному стіканні рідини, коли руху пари немає, або її швидкість $W_0'' < 4 \text{ м/с}$; δ_w — товщина плівки в умовах впливу парового потоку.

Зведена до умов наших досліджень з урахуванням діапазону швидкості пари, в якому виведено формулу (2), залежність (5) має вигляд

$$\delta_w = [1 - 0,022(1,7\rho_n W_0'' - 6)] \delta \quad (6)$$

і дійсна при $1,7\rho_n W_0'' > 6$. З такою поправкою на товщину плівки розрахована залежність для коефіцієнта втрат тиску в зоні впливу швидкості пари на товщину плівки набуває вигляду

$$f = \frac{0,073 \ln(CP)}{Re_n^{0,25}} \left[1 + 24 \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\delta_w}{d} \right]. \quad (7)$$

Формули (4) і (7) задовільно узагальнюють дослідні дані й дають змогу розраховувати коефіцієнти втрат тиску в усьому діапазоні роботи промислових випарних апаратів фруктових соків як з короткими, так і з довгими трубами.

Висновки. Проведено дослідження втрат тиску в процесі випаровування яблучного соку, що у вигляді плівки стікає по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутньому потоці пари. Вперше досліджено опір по довжині труби в зоні високих концентрацій соку і тиску, нижчого ніж $0,3 \text{ бар}$. Результати досліджень коефіцієнта опору на міжфазній поверхні подано емпіричною залежністю від зовнішніх характеристик парорідинного потоку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках. — К.: Техніка, 1972. — 196 с.
2. Кутепов А.М., Стерман Л.С. Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. — М.: Выш. шк., 1986. — 448 с.
3. Форсюк А.В. Теплообмен при выпаривании з поверхности гравитационно стекающих плёнок яблочных соков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/УДУХТ. — К., 1996. — 24 с.
4. Ардашев В.А. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей плёнки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/КТИПП. — К., 1983. — 26 с.
5. Справочник по теплообменникам: в 2 т./ Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1. — С. 175 — 198.

Надійшла до редколегії 17.03.04 р.